

# 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器

刘江 王璞

(北京工业大学激光工程研究院, 国家产学研激光技术中心, 北京 100124)

**摘要** 报道了高功率、窄线宽、全光纤结构的  $2\ \mu\text{m}$  波段掺铥连续光纤激光器。该掺铥连续光纤激光器采用了主振荡功率放大(MOPA)结构设计,通过采用  $790\ \text{nm}$  的多模半导体激光器抽运双包层单模掺铥光纤,获得了稳定的中心波长为  $1963\ \text{nm}$  的窄线宽、连续激光输出,最大输出功率为  $20\ \text{mW}$ 。利用该低功率连续激光作为种子源经过两级掺铥光纤放大器后,平均输出功率达到了  $22\ \text{W}$ ,相应的斜率效率为  $44\%$ ,激光中心波长为  $1963\ \text{nm}$ ,  $3\ \text{dB}$  光谱线宽仅为  $0.24\ \text{nm}$ 。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 光纤放大器; 掺铥光纤; 全光纤结构

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0102001

## High-Power Narrow-Bandwidth Continuous Wave Thulium-Doped All-Fiber Laser

Liu Jiang Wang Pu

(National Center of Laser Technology, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A high-power narrow-bandwidth all-fiber thulium-doped silica fiber master oscillator power amplifier (MOPA) system that consists of a low power thulium-doped continuous wave fiber laser seed and two-stage thulium-doped double-clad fiber amplifiers pumped by fiber-pigtailed multimode diodes at  $790\ \text{nm}$  is reported. The center wavelength of the fiber laser is  $1963\ \text{nm}$  and the  $3\ \text{dB}$  bandwidth is  $0.24\ \text{nm}$ . The maximum output power is  $22\ \text{W}$  at a slope efficiency of  $44\%$  with respect to the launched pump power.

**Key words** lasers; fiber lasers; fiber amplifier; thulium-doped fiber; all-fiber configuration

**OCIS codes** 140.3510; 140.3280; 140.3070

### 1 引言

与传统固体激光器相比,光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、波长可调谐范围大、结构紧凑等优点,能够获得高功率、高亮度以及高光束质量的激光输出,近年来成为激光领域研究的热点之一。此外,随着半导体抽运功率的提高以及大模场面积双包层掺杂光纤的出现,传统掺铥双包层连续光纤激光器的输出功率得到了快速发展,目前已广泛应

用于材料加工、激光医疗、工业制造和军事国防等领域。2004年,英国南安普顿大学采用大模场面积的双包层掺铥光纤作为增益介质,首次由单根光纤获得了千瓦级激光输出<sup>[1]</sup>。2009年,美国IPG公司采用主振荡功率放大(MOPA)技术,使掺铥光纤激光器在单模光束质量下输出功率达到  $9.6\ \text{kW}$ <sup>[2]</sup>。最近几年, $2.0\ \mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器的发展也受到了广泛关注<sup>[3~9]</sup>。由于掺铥光纤有较宽的增益,可

收稿日期: 2012-08-15; 收到修改稿日期: 2012-09-04

基金项目: 国家自然科学基金(61235010, 61177048)和北京市自然科学基金(KZ2011100050011)资助课题。

作者简介: 刘江(1982—),男,博士研究生,主要从事高功率光纤激光器、高功率光纤放大器等方面的研究。

E-mail: liujiang@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

实现  $1.7\sim 2.1\ \mu\text{m}$  波段范围内的激光输出,该波段内的激光处于人眼安全波段,可广泛应用于激光雷达、激光医疗、特殊材料加工以及光学参量振荡器的抽运源等。此外,相对于传统掺镱光纤激光器,掺铥光纤激光器的受激布里渊散射效应和受激拉曼散射效应的产生阈值更高,因此在输出高功率方面具有更大优势。1998年, Jackson 等<sup>[10]</sup>采用  $793\ \text{nm}$  的半导体激光器作为抽运源,纤芯直径为  $17\ \mu\text{m}$  的双包层掺铥光纤作为增益介质,获得了  $2\ \mu\text{m}$  波段的可调谐连续激光输出,最大输出功率为  $5\ \text{W}$ ,斜率效率为  $31\%$ 。2000年,英国南安普顿大学<sup>[11]</sup>采用两个  $787\ \text{nm}$  的半导体激光抽运双包层掺铥光纤实现了  $2\ \mu\text{m}$  波段单模激光输出,输出功率为  $14\ \text{W}$ ,斜率效率为  $46\%$ 。2009年, Moulton 等<sup>[12]</sup>采用中心波长为  $790\ \text{nm}$  的高功率半导体激光器作为激光抽运源,大模场面积掺铥光纤作为增益介质,使掺铥光纤激光器的输出功率达到了  $885\ \text{W}$ ,斜率效率高达  $54.9\%$ ,激光中心波长为  $2050\ \text{nm}$ 。最近,美国 Q-peak 公司利用 Nufern 公司生产的双包层掺铥光纤获得了千瓦级高功率激光输出,激光中心波长为  $2045\ \text{nm}$ <sup>[13]</sup>。然而国内在掺铥光纤激光器方面的研究起步较晚,各方面技术还不成熟,与国外水平相比存在明显的差距。此外,高功率、窄线宽掺铥光纤激光器还可广泛应用于激光雷达和高功率激光光谱组束,因此发展高功率、窄线宽  $2.0\ \mu\text{m}$  波段掺铥光纤激光器具有非常重要的意义。

本文报道了高功率、窄线宽、全光纤结构  $2\ \mu\text{m}$  波段掺铥连续光纤激光器。利用低功率、窄线宽的掺铥连续光纤激光器作为种子源以及两级全光纤结构双包层掺铥光纤放大器,获得了  $22\ \text{W}$  高功率输出,相应的斜率效率为  $44\%$ ,激光中心波长为  $1963\ \text{nm}$ ,  $3\ \text{dB}$  光谱线宽仅为  $0.24\ \text{nm}$ 。但受限于最大抽运功率,输出功率没能进一步提高。

## 2 实验装置

如图 1 所示,低功率、窄线宽掺铥连续光纤激光器采用了全光纤、环形腔结构设计。根据掺铥光纤的吸收特性,其主要在  $790$ 、 $1180$ 、 $1550\ \text{nm}$  波段处各有一个较强的吸收峰,由于  $790\ \text{nm}$  波段处吸收峰大,而  $1180\ \text{nm}$  和  $1550\ \text{nm}$  波段处的吸收峰较小,所以选用光纤耦合输出的中心波长为  $790\ \text{nm}$  的多模半导体激光器作为抽运源,其最大平均输出功率为  $5\ \text{W}$ 。抽运光通过  $(2+1)\times 1$  的合束器的抽

运输入端进入掺铥增益光纤,  $6\ \text{m}$  长的双包层单模掺铥光纤 ( $793\ \text{nm}$  处包层抽运吸收率为  $1.3\ \text{dB/m}$ ) 作为激光增益光纤,掺铥增益光纤的纤芯直径为  $6.0\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.23$ ,内包层直径为  $125\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.45$ 。三端口环形器的隔离度大于  $40\ \text{dB}$ ,从而保证了激光的单向运转;另外,整个掺铥光纤激光器采用环形腔结构设计也有利于抑制激光自脉冲的产生。三端口环形器的第二端口熔接有光纤布拉格光栅 (FBG),其中心波长为  $1963\ \text{nm}$ ,反射率为  $80\%$ ,  $3\ \text{dB}$  光谱线宽约为  $2\ \text{nm}$ 。

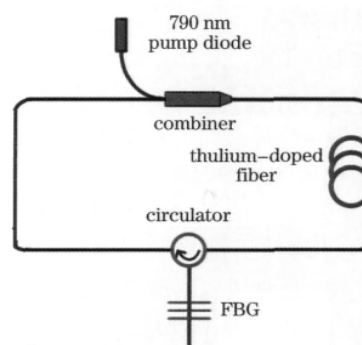


图 1 低功率全光纤结构掺铥连续光纤激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of low-power thulium-doped CW all-fiber laser

如图 2 所示,为了得到更高的输出功率,采用了两级掺铥光纤放大器来对种子光进行功率放大。其中光纤预放大器主要包括偏振无关光隔离器、总输出功率为  $8.6\ \text{W}$  的多模半导体激光器、 $(2+1)\times 1$  的抽运合束器、 $6\ \text{m}$  长的双包层掺铥单模光纤、抽运剥离器等。掺铥增益光纤的纤芯直径为  $10.0\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.15$ ,内包层直径为  $130\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.46$ ,该增益光纤在  $790\ \text{nm}$  处包层抽运吸收率大约为  $3\ \text{dB/m}$ 。光纤功率放大器主要包括高功率的偏振无关隔离器、总输出功率为  $69\ \text{W}$  的多模半导体激光器、 $(6+1)\times 1$  的抽运合束器、 $4.7\ \text{m}$  长的大模场面积的双包层掺铥光纤、抽运剥离器等。大模场面积的掺铥增益光纤的纤芯直径为  $20.0\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.11$ ,内包层直径为  $400\ \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.45$ ,该增益光纤在  $790\ \text{nm}$  处包层抽运吸收率大约为  $4.5\ \text{dB/m}$ 。为了保证激光稳定工作,光纤输出端面  $8^\circ$  角切割,避免光纤端面的菲涅耳反射产生激光寄生振荡。

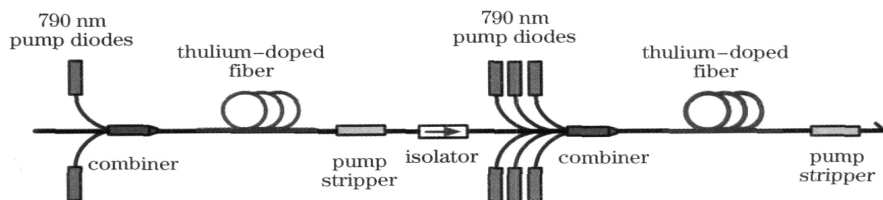


图2 高功率全光纤结构掺铥光纤放大器实验装置图

Fig. 2 Schematic setup of high-power thulium-doped all-fiber amplifiers

### 3 实验结果与分析

在半导体激光注入抽运功率大约为 1.5 W 时, 掺铥光纤激光种子源开始产生稳定的连续激光输出, 由于掺铥增益光纤与无源光纤直接的熔接损耗相对较高以及三端口环形器的插入损耗相对较大(4 dB), 所以掺铥光纤激光器的起振阈值较高。图 3 为采用分辨率为 0.05 nm 的光谱分析仪(YOKOGAWA AQ6375)测得的种子激光的光谱, 其中心波长为 1963 nm, 3 dB 光谱线宽为 0.24 nm。当抽运功率增加到 3 W 时, 掺铥种子激光的平均输出功率达到了 20 mW, 平均输出功率没能进一步增加只是受限于三端口环形器的最大承受功率。另外, 还可以通过降低光纤布拉格光栅的反射率来提高掺铥光纤激光器的平均输出功率。为了给掺铥光纤功率放大器提供足够的种子功率, 掺铥光纤激光种子源经过了一级掺铥光纤预放大器, 最后从光纤预放大器输出的最大功率可达到 2.5 W(抽运功率为 8.6 W), 而放大后的激光的中心波长以及光谱线宽与种子源保持一致。

由于掺铥光纤激光器以准三能级方式运转, 掺杂光纤的温度对激光输出特性影响很大, 所以光纤功率放大器中的掺铥光纤固定在水冷却的热沉上,

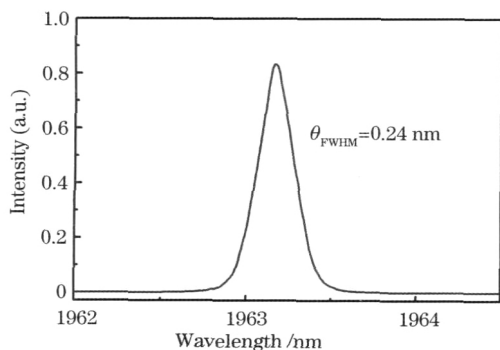


图3 低功率掺铥连续光纤激光器的光谱

Fig. 3 Optical spectrum of low power CW thulium-doped all-fiber laser

用来减少量子亏损、提高激光斜率效率。图 4 为掺铥光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率变化的关系图。从图中可以看出, 在预放大器输出功率分别为 0.7、1.1、1.4 W 时, 光纤功率放大器的平均输出功率几乎随抽运功率线性增加。当抽运功率水平较低时, 由于抽运源的中心波长大约在 785 nm 处, 导致输出激光的斜率效率也较低。随着抽运功率的增加, 中心波长逐渐接近 790 nm, 双包层掺铥光纤对抽运光的吸收效率增加, 激光斜率效率也有所增加。当光纤预放大器的输出功率为 1.4 W 时, 光纤功率放大器产生了 22 W 的功率输出(此时抽运功率为 69 W), 相应的斜率效率为 44%, 输出功率没能进一步增加受限于当前的最大抽运功率。光纤中非线性效应的发生将导致激光输出功率的急剧降低, 然而从图 4 中可以看出, 在高抽运功率情况下连续掺铥激光的斜率效率并没有任何降低, 所以本实验并没有产生受激布里渊散射、受激拉曼散射等非线性效应。这归因于掺铥增益光纤较高的掺杂浓度以及较大的纤芯直径, 它们有效地提高了非线性效应产生的阈值。

图 5 为掺铥光纤功率放大器输出功率分别为 5、10、20 W 时的输出光谱, 从图中可以看出, 不同输出功率下光谱形状、中心波长以及光谱线宽基本保

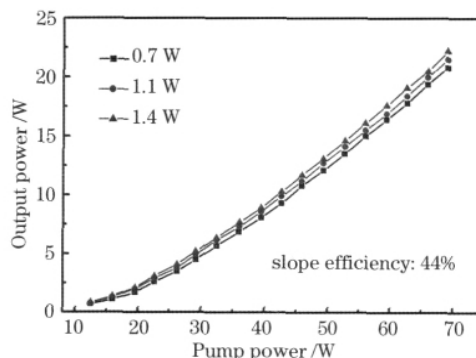


图4 不同预放大器输出功率下光纤功率放大器平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 4 Average output power versus pump power with different powers of pre-amplifier

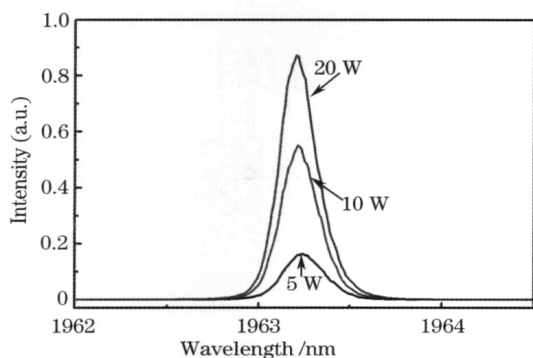


图 5 掺铥光纤功率放大器的输出光谱  
Fig. 5 Optical spectra of the thulium-doped all-fiber power amplifier

持不变。在最大输出功率为 22 W 时测得输出激光的中心波长为 1963 nm, 3 dB 光谱线宽为 0.24 nm, 基本与种子激光的中心波长保持一致。由于掺铥光纤激光种子源的光谱线宽较窄, 因此经过两级双包层光纤放大器之后可以得到较窄的光谱线宽。另外, 如图 6 所示, 对整个掺铥光纤激光器的输出功率和输出光谱进行了监测, 当抽运功率为 65 W 时, 掺铥光纤功率放大器产生了大约 20 W 的平均输出功率, 在 1 h 内测得输出功率波动为  $\pm 0.9$  W, 认为输出功率的波动主要受掺铥光纤预放大级功率的影响, 由于光纤预放大级中的掺铥光纤处于自然状态没有进行强制冷却, 从而导致预放大器输出功率受环境温度波动较大。适当控制掺铥光纤预放大器输出功率的波动, 光纤功率放大器将可以得到更加稳定的激光输出。

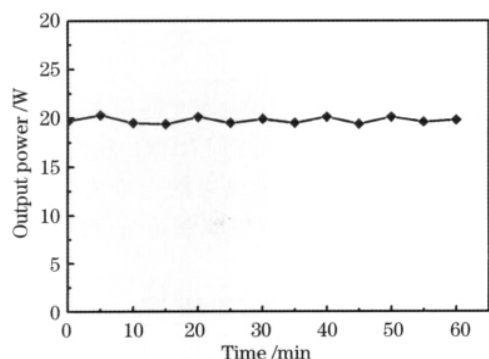


图 6 掺铥光纤功率放大器输出功率稳定性测量  
Fig. 6 Power stability of thulium-doped all-fiber power amplifier

#### 4 结 论

报道了高功率、窄线宽、全光纤结构的  $2 \mu\text{m}$  波段掺铥连续光纤激光器。该掺铥连续光纤激光器采

用了主振荡功率放大结构设计, 低功率、窄线宽的种子源采用 790 nm 的多模半导体激光器抽运双包层掺铥光纤, 窄带 FBG 作为激光谐振腔镜, 实现了稳定的中心波长为 1963 nm 的窄带连续激光输出, 最大输出功率为 20 mW。利用该窄带连续激光作为种子源经过两级双包层掺铥光纤放大器后, 获得了 22 W 的高功率输出, 激光斜率效率为 44%, 1 h 内输出功率波动为  $\pm 0.9$  W, 此时测得激光中心波长为 1963 nm, 3 dB 光谱线宽为 0.24 nm。此类高功率、窄线宽、全光纤掺铥激光器可应用于光谱组束, 实现更高功率的激光输出。

#### 参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 IPG Photonics. IPG Photonics Successfully Tests World's First 10 Kilowatt Single-Mode Production Laser [OL]. [http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR\\_Final\\_10kW\\_SM\\_laser.pdf](http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/PR_Final_10kW_SM_laser.pdf), 2000
- 3 Y. Tang, C. Huang, S. Wang *et al.*. High-power narrow-bandwidth thulium fiber laser with an all-fiber cavity [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(16): 17539~17544
- 4 G. D. Goodno, L. D. Book, J. E. Rothenberg. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1204~1206
- 5 Y. J. Zhang, B. Q. Yao, Y. L. Ju *et al.*. LD-cladding-pumped 50 pm linewidth Tm<sup>3+</sup>-doped silica fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11): 7715~7719
- 6 F. Wang, D. Shen, D. Fan *et al.*. Spectrum narrowing of high power Tm<sup>3+</sup> fiber laser using a volume Bragg grating [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 8937~8941
- 7 Zhao Junqing, Du Geguo, Zhang Lingcong *et al.*. Experimental studies on double-end pumped thulium doped fiber laser [J]. *Applied Laser*, 2011, **31**(4): 332~337
- 8 赵俊清, 杜戈果, 张灵聪等. 双端泵浦掺铥光纤激光器的实验研究 [J]. *应用激光*, 2011, **31**(4): 332~337
- 9 Du Geguo, Zhao Junqing, Zhang Lingcong *et al.*. Studies on Tm-doped double-clad fiber lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 020005
- 10 杜戈果, 赵俊清, 张灵聪等. 掺铥双包层光纤激光器研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(2): 020005
- 11 Wang Fei, Shen Deyuan, Fan Dianyuan *et al.*. Efficient Ho: YLF laser pumped by tunable Tm-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1727~1731
- 12 王 飞, 沈德元, 范滇元等. 可调谐掺铥光纤激光器共振抽运的 Ho: YLF 固体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1727~1731
- 13 S. D. Jackson, Terence A. King. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18): 1462~1464
- 14 R. A. Hayward, W. A. Clarkson, P. W. Turner. Efficient cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser with high power single mode output at 2  $\mu\text{m}$  [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 711~712
- 15 P. F. Moulton, G. A. Rines, E. Slobodtchikov *et al.*. Tm-doped fiber lasers: fundamentals and power scaling [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 85~92
- 16 Thomas Ehrenreich, Ryan Leveille, Imtiaz Majid *et al.*. 1-kW, all-glass Tm fiber laser [C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 758016

栏目编辑: 宋梅梅